基于长期观测研究支撑亚热带红壤丘陵区森林生态系统恢复与可持续发展

马泽清　王辉民*　杨风亭　付晓莉　方华军　王景升　戴晓琴　寇 亮　赵 博

1 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101

2 中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站 吉安 343700

摘要　南方红壤区和亚热带森林交错，是我国生态文明建设重要的空间载体；提升生态服务功能，传承健康稳定的生态系统，是区域可持续发展面临的重大挑战。中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站（以下简称"千烟洲站"）地处亚热带典型红壤丘陵山区，以亚热带人工林、常绿阔叶林、次生林等生态系统为研究对象，采用长期定位观测、控制实验与模拟等方法，研究亚热带森林生态系统结构与功能。在国内率先引进碳水通量观测技术，突破了涡度相关与稳定同位素技术协同观测的技术瓶颈，从点到面阐明了我国亚热带森林对全球变化响应适应机制；揭示了流域尺度物质循环与生态水文过程耦合机制；创新人工林生态系统多目标经营理论、关键技术与示范模式；在地下生态过程研究取得突破性进展，首次提出了基于植物根系的植物进化理论。千烟洲站是以林为主、山水林田湖草生态系统恢复和可持续发展的典型代表，是我国亚热带森林生态系统功能演替序列研究的重要野外平台，已成为我国生命科学和地学交叉的代表性的综合观测研究站。

关键词　地下生态过程，水土流失，生态恢复，通量，生态水文，人工林

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20201209001

我国拥有世界上独特的亚热带常绿阔叶林，其在生物多样性演化、生态系统物质循环研究中具有重要地位。同时，亚热带森林是长江经济带生态屏障，对于维系区域生态安全、消解环境污染具有重要的作

*通讯作者

资助项目：国家自然科学基金（31822010、31971633），中国科学院基础前沿科学研究计划"从0到1"原始创新项目（ZDBS-LY-DQC023）

修改稿收到日期：2020年12月9日

用。观测研究亚热带森林生态系统是全球生态系统联网研究不可或缺的组成部分。我国红壤区与亚热带森林交错，承载了近4亿人口；其中，60%以上的面积为低山丘陵，对应了约60%的森林覆被。高强度的人类活动叠加气候变化导致红壤丘陵区生态系统功能衰退，目前已成为制约社会经济可持续发展的“瓶颈”问题。

中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站（原“中国科学院-江西省千烟洲红壤丘陵综合开发试验站”，以下简称“千烟洲站”）地处我国南方红壤丘陵区，是以林为主、山水林田湖草生态系统恢复和可持续发展研究的典型代表（图1）。千烟洲站围绕亚热带森林生态系统结构与功能、山水林田湖草生态系统综合治理和生态恢复等核心问题，以亚热带人工林、常绿阔叶林、次生林等生态系统为研究对象，采用野外长期定位观测、控制实验与模型模拟等方法，研究森林生态系统结构、功能与关键过程，重点探索地下生物过程及其与地上结构功能的协同反馈机制，生态系统碳氮水通量及其对全球变化响应规律，流域物质循环与生态水文耦合过程，创新人工林生态系统多目标经营理论、关键技术与示范模式，发展森林生态学和恢复生态学，为红壤丘陵区生态系统管理与可持续发展提供科技支撑。



图1　1983—2017年千烟洲站植被景观变化

1 亚热带森林生态系统碳汇特征及环境生物控制机制研究

我国拥有世界上面积最大的人工林，大量幼龄亚热带人工林碳汇功能显著，该过程的监测研究对于理解北半球碳汇源关系具有重要意义。目前，千烟洲站是全球亚热带人工林生态系统最具代表性的通量站。

1.1 率先引进碳水通量观测技术，建立通量观测技术体系与方法论

2002年，千烟洲站在国内率先引进碳水通量观测技术（图2），长期定位观测植被-大气界面碳水热通



图2　亚热带森林碳水通量观测平台

量特征，率先在国内建立了植被-大气界面碳、水通量观测平台，积累了长达18年的碳水通量及辅助因子连续观测数据，目前已出版专著2部，引领和带动了我国碳水通量观测事业的发展。千烟洲站系统解决了复杂地形地貌条件下碳水通量数据处理中的技术难题，研制了通用性的碳水通量数据分析技术规范和计算机自动化处理系统，建立了复杂地形、植被条件下生态系统碳水通量观测技术数据分析方法论。

1.2 开创了稳定同位素原位观测技术在碳、氮、水循环研究中的应用

千烟洲站在国际上较早实现了大气水汽 $\delta^{18}O$、δD 和 CO_2、$\delta^{13}C$ 同步原位连续观测：研发了叶片-茎杆-土壤连续体 $\delta^{13}C$ 观测系统，突破了涡度相关与稳定同位素技术协同观测的技术瓶颈，推动了稳定同位素技术在生态系统研究中应用；研发了土壤微生物呼吸 $\delta^{13}C$ 全自动变温模拟与测定系统[1]；提出了“连续变温培养+连续自动测定”的土壤有机质分解温度敏感性研究的新模式；发展了考虑温度和水分对温度敏感系数（Q_{10}）影响的耦合模型，从而更准确地描述干旱胁迫下生态系统呼吸的季节模式，以及预测干旱胁迫下生态系统呼吸的季节变异。

1.3 揭示亚热带人工林生态系统碳氮收支及其影响机制

千烟洲站开展的长期生态学观测记录了生态系统渐变性和突变性的生态事件（图3），为预测管理森林功能奠定了坚实的基础。亚热带人工针叶林15年平均生态系统净生产力（NEP）为460 g C m^{-2}，其碳汇能力远高于寒带和温带地区[2-4]，有力支撑了亚热带森林在全球碳增汇功能中的重要地位[5]。尽管人工造林是提高生物量和群落多样性的有效手段[6,7]，但人工林生态系统功能面临较大的不确定性，特别是亚热带人工林碳库易受极端气候事件的影响。2008年早春的冰雪灾害，仅有0.3%马尾松和7.5%湿地松林的地上生物量受损[8]，但生态系统的碳汇功能却显著降低了近20%[9]。

1.4 揭示亚热带森林生态系统碳氮水动态特征及环境生物控制机制

亚热带森林与温带森林不同，季节性干旱显著降低了人工林的碳吸收能力[3]，早春低温是限制人工林生态系统碳交换的关键因子[10]，生态系统对极端气候

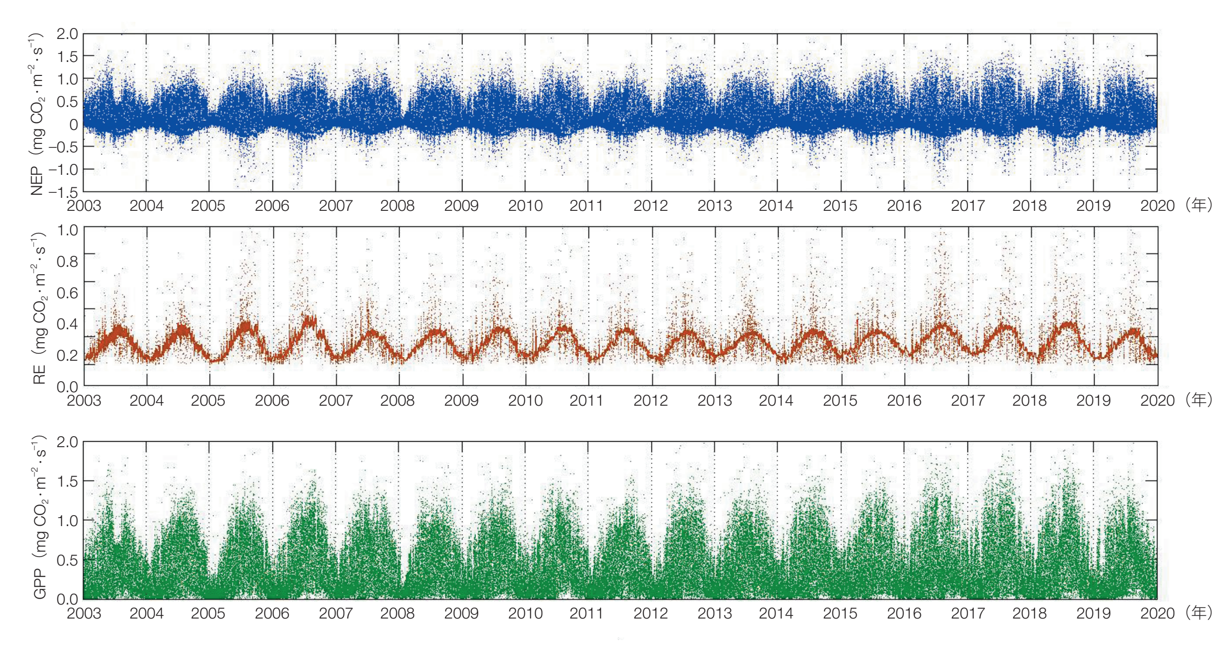


图3　2003—2020年千烟洲森林生态系统净生态系统生产力（NEP）、生态系统呼吸量（RE）和总初级生产力（GPP）

事件（如干旱、冰雪等灾害）的响应具有时滞性。亚热带人工林凋落物层对土壤甲烷汇具有双向调控作用：干旱时，凋落物层阻碍了大气甲烷进入土壤，降低了土壤对甲烷氧化吸收率；湿润时，凋落物层则阻碍了土壤产生的甲烷向大气扩散，促进了土壤对甲烷氧化吸收[12]。蒸散的控制因子在干旱和非干旱年份不同，阐明冠层导度是干旱胁迫期蒸散的主要控制因素，揭示生态系统对快速变化的气象因子的响应具有时滞性。阐明了亚热带森林生态系统碳、氮、水耦合循环及其对环境变化的响应机制，为全球变化背景下人工林生态系统管理提供了重要科学依据。该成果获国家科技进步奖二等奖，重要成果在 *PNAS* 等刊物上发表。

2 创新了根系—根际生态学的理论与方法体系

2.1 根系—根际生态学监测方法体系和研究网络建设

对生态系统地下过程的科学认识是生态学研究的热点和难点。千烟洲站以树木根系为突破口，研发了根箱、根窗等新型观测技术（图 4）。开展了地下生态学过程长期定位实验。以千烟洲站为起点，在不同生态系统推广了根结构功能的研究体系，并针对不同森林类型根系模块的周转和分解开展了观测与研究，创建了大陆尺度的“根系生物学和生态过程观测研究网络”（RhizoNet），为根系、土壤微生物及生态系统功能相联系建立了研究平台，创新了根系—根际生态学的理论和原位监测方法体系，自主建立吸收根功能属性数据库，发展了地下生态学方法理论体系。

2.2 “根系寿命模块”学说的提出及其应用

千烟洲站基于长期亚热带森林根系生态过程观测和理论探索，系统地发展了吸收根的定义及鉴别方法，提出“根系寿命模块”学说，为定量细根生长、死亡、周转及物候开辟了新方向，并较早将吸收根模块学说应用于根系周转和分解等方面，提高了生态系统地下生产力观测的准确性。基于吸收根模块的新定义，测定了我国亚热带森林 96 个树种根属性，发现根系功能属性可从 2 个维度阐释，即保守的根直径与可塑的根系分支结构[13]。

进一步分析了根与共生真菌关系，较早地提出了菌根真菌资源互补理论[14]。在群落尺度，植物借助菌根增加了其捕获资源的有效性和存活的可能性，特别



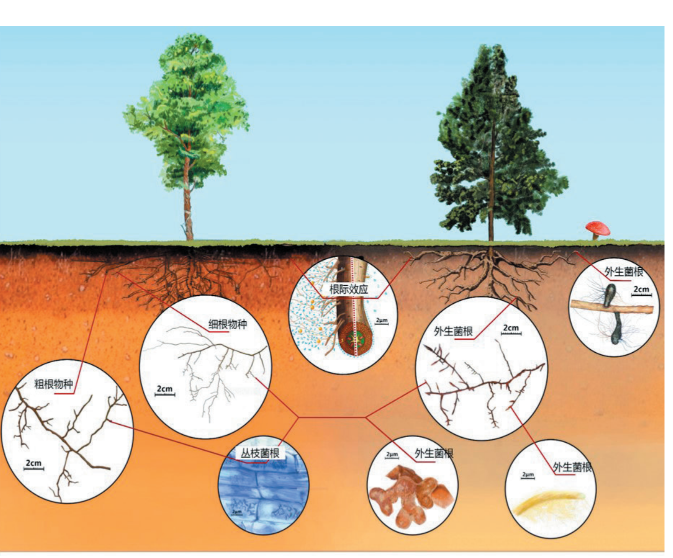


图 4 根系—根际生态学理论和原位监测方法体系

（a）根生物学过程创新观测体系；（b）根系多样性

是丛枝菌根真菌在调节植物种间竞争和植被群落结构方面具有重要作用[15]。在生态系统尺度，菌根类型是理解碳氮循环的重要参数，外生菌根和丛枝菌根对生态系统碳氮循环具有显著差异[16]。

千烟洲站以根功能属性为突破口，阐释了吸收根模块的结构和功能，观测和定量了根系生产力过程，探讨了植物与微生物的协同平衡关系，为理解森林生态系统功能的形成机理提供了独特视角。

2.3 揭示了大尺度根生物地理格局，提出了全新的植物进化理论

千烟洲站围绕根系生物学及地下生态学关键科学问题，将亚热带森林根系结构和功能研究拓展到全球多个生物群区，在理论上取得了重大原创性突破。通过对全球9个根属性的生物地理格局综合集成分析发现，从荒漠到热带雨林，根功能属性存在系统性的生物地理格局。

基于这个格局，Ma 等[17]提出了一个全新的植物进化理论（图5）：在长达4亿年的植物进化过程中，地下吸收根朝更加高效、独立的方向进化，为物种开拓新的栖息地发挥了重要作用，促进了植物的传播和进化。这些工作揭开了植物生存和传播一些隐秘的“地下规则”，对于理解植物资源获取策略、生物地球化学循环模拟和生物多样性保护至关重要。

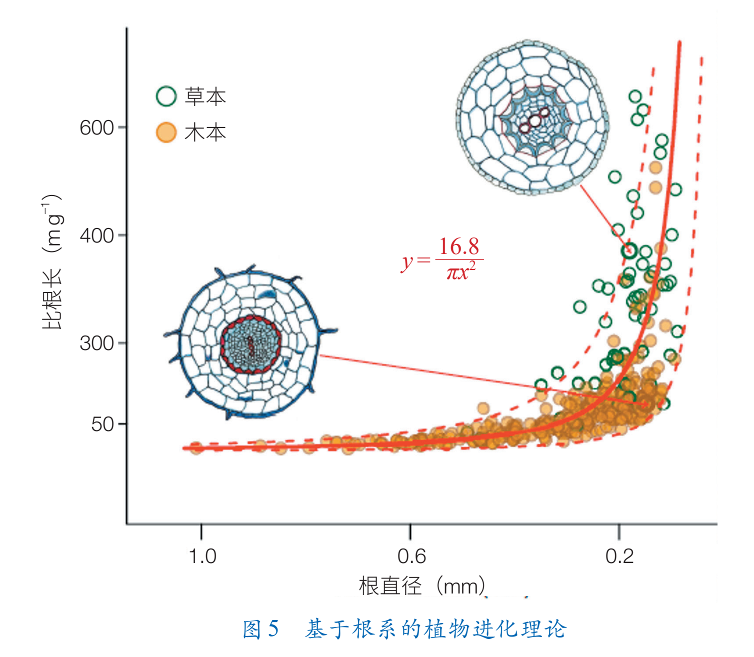


图5 基于根系的植物进化理论

3 阐明了亚热带森林地下生态学过程与地上结构功能的互馈机制

3.1 揭示了亚热带森林根系生命周期和分解过程的环境调控机制

围绕森林根系过程变异性大、机制不明确等关键科学问题，创新应用“根系寿命模块”理论，揭示了吸收根与运输根生命周期（生长、死亡、周转）、分解全过程对氮沉降的响应差异，为开展根系过程时空与种间变异及环境调控机制研究提供了新思路[18]。明晰了水分和温度分别是亚热带季节性干旱森林根系生产（量）与物候（时机）的主控因子，发现量与时机间的权衡是植物根系应对环境变化的重要适应策略[19]。阐明了生态系统磷限制加剧是亚热带森林地下生产力增加的关键驱动因子；率先发现根系酸不溶组分与氮离子结合是氮沉降抑制根系分解的重要途径[18,20]。从根系过程角度，揭示了吸收根周转加快、分解变慢是氮沉降背景下亚热带森林土壤碳汇增加的重要形成机制。

3.2 多手段、多视角揭示微生物介导的土壤氮转化关键过程及驱动因子

针对土壤微生物群落结构复杂、氮转化过程难预测等问题，较早地融合 ^{15}N 同位素技术、土壤氮转化模型及高通量测序等手段，发现微生物 NH_4^+ 循环在低速率 NH_4^+ 沉降情形下处于开放状态，而在高铵氮沉降情形下处于耦合状态；指明 NO_3^-（而非 NH_4^+）沉降抑制土壤自养硝化与硝酸盐固持[21]。明晰了氨氧化微生物、硝化作用及土壤酸化是氮沉降加剧亚热带森林向大气圈排放氧化亚氮的主控因子，对预测森林生态系统氮损失风险有重要指示意义。从氮循环功能微生物丰度、种群结构及酶活性多视角揭示了氮、磷添加促进亚热带森林土壤氧化亚氮排放和硝酸盐淋失的潜在

风险[22,23]，为人工林氮、磷养分管理提供了重要理论依据。

3.3 揭示了氮磷添加下亚热带人工林土壤和微生物过程及机制

土壤生物系统碳氮交互作用及其驱动机制是当前研究的热点领域。基于千烟洲站开展的长期氮磷添加控制试验，分析了亚热带人工林土壤有机质动态的影响[24]、土壤酶活性[25]、微生物群落结构[26]。研究发现氮素富集条件下，土壤有机质浓度的变化与细颗粒有机碳、矿质结合态有机碳浓度正相关，外源氮输入降低中国南方亚热带人工林土壤有机质的矿化-腐殖化作用，不利于土壤有机质的积累，但显著改变其化学结构。

4 建立了亚热带人工林多目标经营技术和理论体系

4.1 亚热带常绿阔叶林多样性和生态功能维持机制

我国亚热带原生常绿阔叶林物种多样性高、林分结构复杂，精确估算其森林结构特征、探索其结构与功能关系及物种共存机制，对多目标森林经营管理具有重要的指导意义。通过对亚热带森林 85 种树木研究，发现叶片水分属性（水汽交换模块）与经济学属性（光捕获模块）独立变异，意味着叶片内存在 2 套独立变化的属性。在不同物种中，这 2 套属性可以自由组合，形成了叶片结构和功能多样的分化，有助于解释热带-亚热带较高的物种多样性，也对理解植物生态策略及功能多样性有理论价值[27]，该研究成果被 *Ecology Letters* 选为封面故事。在生态系统尺度，发现常绿阔叶林生产力显著高于同区的人工针叶纯林，养分归还显著快于针阔混交林和高山矮林等其他森林类型，同时具有较高的氮素利用效率、固碳能力和病虫害抵御能力。在区域尺度，利用植被聚集指数，研发了新的遥感产品，显著提高了亚热带森林结构特征估算精度，成功用于模拟与预测气候变化情景下亚热带森林的分布及结构变化[28]。

4.2 亚热带人工针叶林垂直结构与水平结构管理新策略

针对亚热带人工林结构单一、抗逆性差、功能低等问题，千烟洲站以地带性常绿阔叶林为参照，解析了亚热带常绿阔叶林群落结构构建的生物学机制及植物群落结构演变规律；探索了人工纯林近自然改造与功能提升的理论体系，发展了亚热带人工林林木管理、林下植被管理的理论与技术。

在林分垂直结构上突破传统认知，发现林下植被与乔木既竞争又协同。而林下植被同时具有重要的水土保持功能，能缓解土壤酸化、优化土壤微生物群落结构，且人工林林下植被生态功能的发挥主要是由其生物量而非多样性决定[29]。因此，提出“适度提高林下植被生物量”的亚热带人工针叶林垂直结构管理新策略。此外，基于植物种间水分生态位、细根生长物候和养分生态位（吸收偏好、根际效应）互补特性解析，筛选出了适宜于杉木和马尾松林下保留的灌木物种[30,31]。

在林分水平结构上，揭示了人工林水平结构对土壤生物肥力和水分演变的影响机制，明确了叶根凋落物输入比和土壤水分消耗对林分生产力演变的指示作用。发现间伐促进保留木生长的新机制：适宜的间伐强度可通过提高叶/根凋落物输入比例，改善土壤微食物链结构，从而提高土壤生物肥力；揭示在湿润的亚热带针阔混交林根层水分剧烈消耗会对林木生长起负反馈作用，建议营造混交林时应考虑植物水力学属性[32,33]。发现深层根系水分利用灵活性是植物经济谱的重要组成部分[34]；解析“植物等水程度”的地上、地下协同调控机制，提出“优选补植极端等水阔叶树种”的针叶纯林初期混交化策略（图 6）。

4.3 亚热带流域-区域尺度物质迁移转化与多过程耦合作用机制研究

20 世纪 80 年代，千烟洲站即对九连山、兴国和千烟洲生态水文循环过程进行观测；近年来，构建了千烟

洲-雁门水-赣江-鄱阳湖流域观测平台；开展了多尺度流域生态水文过程观测研究，以及红壤丘陵区关键带研究工作，建立了岩石-土壤-植被-大气层多圈层观测体系，研究了亚热带红壤丘陵区多尺度流域物质循环过程及其水文驱动机制，系统解析了流域从垂直界面到水平界面的碳氮水的迁移转化过程与环境效应。

水土流失是红壤丘陵山区突出的生态环境问题。经过长期定位观测，发现壤中流过程明显加剧了南方土壤氮磷淋失，并且壤中流中的溶解性有机碳（DOC）、碳磷淋溶效应大于地表径流。在小流域内，全年70%—80%的生物可利用磷的流失集中在雨季，但存在滞后效应，降雨过程中生物可利用磷的流失是地区水体富营养化的主要成因[35]。陆地和水生态系统对氮的固定、吸收与流失的需求不同，从而导致了2种生态系统氮健康阈值的差异。该项研究探讨了淡水生态系统的最佳碳氮磷比，用于指示淡水生态系统健康状态。

5 “千烟洲模式”——促进红壤丘陵区域生态恢复与经济协同发展

5.1 为地方生态恢复及经济发展提供了科技支撑和模式样板

我国南方红壤丘陵区受亚热带季风气候控制，岩石类型多样，以林为主，山水林田湖草系统嵌套，人地相互作用强烈。高强度的人类活动和粗放的经营管理，导致该地区水土流失严重、土壤养分大量流失，生态退化问题极其严重。千烟洲站以生态修复实践和生态经济协同发展为己任，强调生态管理的系统性、理论的应用性、学科的综合性。经过40年不断建设，在荒山草坡上通过生态恢复形成的综合研究示范基地，创立了著名的“丘上林草丘间塘，河谷滩地果鱼粮”的“千烟洲模式”（图7）。

“千烟洲模式”较早提出立体大农业模式，系统集成了农林牧渔高产高效技术，建成发展了资源综合利用优化模式，建立了小流域综合管理体系，为科学与政策架起了一道桥梁，为解决红黄壤区水土流失和农村资源综合开发作出了重大贡献。随后，千烟洲站承担了南方红黄壤地区综合治理和农业可持续发展技术研究的攻关任务，开展了林果经、林牧粮等资源综合开发关键技术，并进一步优化了该模式。近年来，迭代升级的“千烟洲模式2.0”，打造出可复制、可推广的山水林田湖草-人生命共同体示范样板，服务于国家生态文明建设及美丽中国“江西样板”建设。

“千烟洲模式”被联合国教科文组织授予全球生态修复“百佳”，入选联合国环境署全球森林恢复典型案例，成为生态恢复的国际样板。此外，“千烟洲模式”还荣获国家科技进步奖二等奖，并被写入我国高中地理教科书，以及入选中华人民共和国建国50周年成就展。

图6　亚热带针叶纯林间伐补阔的水力学机理

5.2 亚热带人工林改造、技术集成与示范

随着极端气候事件频发及强度增加，干旱胁迫加剧，亚热带森林生态系统变得更加脆弱。千烟洲

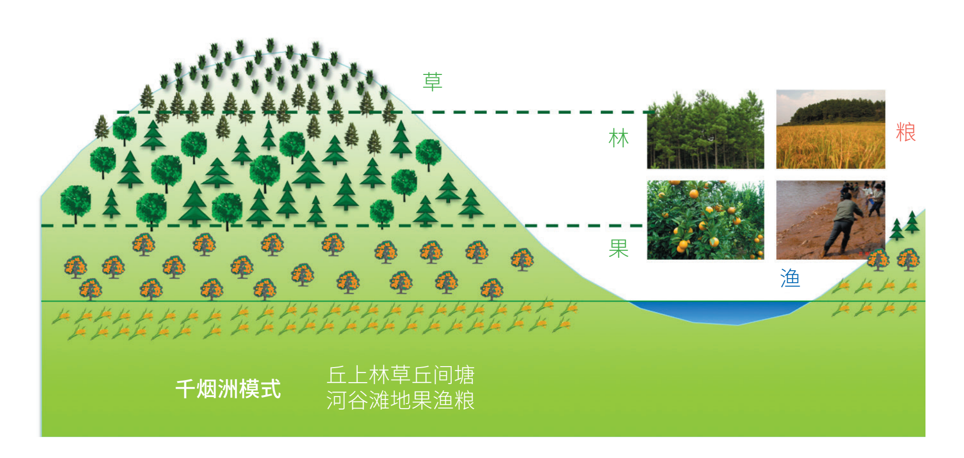


图 7 “千烟洲模式”示意图

站努力践行山水林田湖草系统治理与绿色发展的理念，开展了亚热带人工林生态系统的结构优化与功能提升及试验示范，探索出了亚热带人工林质量提升和林区经济协调发展的有效途径。

（1）人工林结构优化与功能提升示范。针对大面积针叶人工林质量不高、抗性较差、功能低下等问题，提出 2 个改造方向。① 突出木材生产功能建立经济效益较高、大径材丰产林。设计了间伐材积 50%、25% 和不间伐处理实验。② 突出生态与碳汇功能，形成复层异龄生态林。采用伐针补阔模式进行改造，在间伐之后补种木荷、枫香等乡土阔叶树种，建立了复层-异龄-混交林，促使人工林从单一生产功能到综合生态功能转变。

（2）低效林改造技术集成与示范。低效的马尾松林（小老头林）长势较差，严重退化，生态服务功能较低。试验站在于都建立了小老头松林改造示范区（面积 0.86 km^2），主要通过水土流失防护的工程措施（如水平沟、竹节壕等）、灌草物种选育及添加、稻草及秸秆覆盖和（微生物肥）肥料管理等，提高人工林水土涵养功能，加速退化生态系统恢复。

（3）高附加值人工林与立体生态种养模式与示范。① 四季生态果园发展模式。均衡生产，达到四季劳作而不忙、四季产果而多样，并带动研学旅游，实现生态、经济和社会效益的深度融合。② 丘陵区生态经济林果可持续性与高效性经营组合发展模式。例如，果粮（油）复合经营丰产栽培模式、果药复合经营丰产栽培模式，以及果禽复合经营丰产栽培模式等。

5.3 雁门水流域-山水林田湖草生命共同体试验示范

以千烟洲站为核心，包含周边 73 km^2 的区域即为雁门水流域，“雁门水流域山水林田湖草生命共同体试验区建设”被列为江西省生态文明三大典型示范区之一。通过雁门水及其支流河道整治、山塘水系连通、农业面源污染防控及森林结构优化，实现流域生态功能全面提升；通过生态农业、生态林果业和研学旅游服务业发展，实现流域绿色产业跨越式发展；通过村容村貌、基础设施和人居环境改善，实现生活品质全面提高；通过乡村组织结构创新、强化内生动力，实现流域三生共荣。

长期生态恢复机理研究和数据积累，为生态系统服务形成机理与示范、区域社会经济可持续发展奠定了坚实的科学基础。千烟洲站所在的灌溪镇被评定为“江西省山江湖可持续发展实验区”，所在的泰和县被科学技术部列为“国家可持续发展实验区”。目前，已启动“泰和县雁门水系生态保护与修复”、“吉安市大气污染源排放清单与颗粒物来源解析”等多个地方项目。

6 结语

40 年来，千烟洲站始终围绕国家生态建设重大需求和学科发展，在红壤丘陵区生态恢复、亚热带森林地下生态过程和地表通量等方面取得了一大批原创性成果，解决了红壤丘陵区水土流失、人工林管理、小

流域综合治理急需解决的现实需求，回答了生命科学与地球科学前沿科学问题，为生态文明建设和区域可持续发展提供了重要的科技支撑。

千烟洲站重点探索生态系统服务功能与人类福祉之间关系，建立并发展生态经济协同示范模式，不断落实“美丽中国”战略任务。千烟洲站的生态恢复理论与实践、长期生态学观测研究，将在我国红壤丘陵区山水林田湖草-人类生命共同体发挥理论指导和技术支撑中发挥重要作用。

致谢 感谢中国科学院地理科学与资源研究所于秀波、李胜功、温学发、高扬、张心昱、张时煌对文章的建议。

参考文献

1 Chen C H, Wei J, Wen X F, et al. Photosynthetic carbon Isotope discrimination and effects on daytime NEE partitioning in a subtropical mixed conifer plantation. Agrcultural and Forest Meteorology, 2019, 272-273: 143-155.

2 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林CO_2通量季节变化及其环境因子的影响. 中国科学（D辑：地球科学）, 2004, 34(S2): 109-117.

3 Wen X F, Wang H M, Wang J L, et al. Ecosystem carbon exchanges of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought, 2003-2007. Biogeosciences, 2010, 7(1): 357-369.

4 Xu M J, Wang H M, Wen X F, et al. The full annual carbon balance of a subtropical coniferous plantation is highly sensitive to autumn precipitation. Scientific Reports, 2017, 7(1): 10025.

5 Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. PNAS, 2014, 111(13): 4910-4915.

6 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 等. 江西千烟洲人工林生态系统的碳蓄积特征. 林业科学, 2007, 43(11): 1-7.

7 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理20年后的千烟洲植物多样性. 植物生态学报, 2005, 29(5): 766-774.

8 Ma Z Q, Hartmann H, Wang H M, et al. Carbon dynamics and stability between native Masson pine and exotic slash pine plantations in subtropical China. European Journal of Forest Research, 2014, 133(2): 307-321.

9 Zhang W J, Wang H M, Wen X F, et al. Freezing-induced loss of carbon uptake in a subtropical coniferous plantation in Southern China. Annals Forest Science, 2011, 68(6): 1151-1161.

10 Zhang W J, Wang H M, Yang F T, et al. Underestimated effects of low temperature during early growing season on carbon sequestration of a subtropical coniferous plantation. Biogeosciences, 2011, 8(6): 1667-1678.

11 Wang Y D, Li Q K, Wang H M, et al. Precipitation frequency controls interannual variation of soil respiration by affecting soil moisture in a subtropical forest plantation. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(9): 1897-1906.

12 Wang Y D, Wang H M, Ma Z Q, et al. The litter layer acts as a moisture-induced bidirectional buffer for atmospheric methane uptake by soil of a subtropical pine plantation. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 66: 45-50.

13 Kong D L, Ma C G, Zhang Q, et al. Leading dimensions in absorptive root trait variation across 96 subtropical forest species. The New Phytologist, 2014, 203(3): 863-872.

14 Liu B T, Li H B, Zhu B, et al. Complementarity in nutrient foraging strategies of absorptive fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi across 14 coexisting subtropical tree species. The New Phytologist, 2015, 208(1): 125-136.

15 Lin G G, McCormack M L, Guo D L. Arbuscular mycorrhizal fungal effects on plant competition and community structure. Journal of Ecology, 2015, 103(5): 1224-1232.

16 Lin G G, McCormack M L, Ma C G, et al. Similar below-

ground carbon cycling dynamics but contrasting modes of nitrogen cycling between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal forests. The New Phytologist, 2017, 213(3): 1440-1451.

17 Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. Nature, 2018, 555(7694): 94-97.

18 Kou L, Jiang L, Fu X L, et al. Nitrogen deposition increases root production and turnover but slows root decomposition in *Pinus elliottii* plantations. The New Phytologist, 2018, 218(4): 1450-1461.

19 Kou L, Li S G, Wang H M, et al. Unaltered phenology but increased production of ectomycorrhizal roots of *Pinus elliottii* under 4 years of nitrogen addition. The New Phytologist, 2019, 221(4): 2228-2238.

20 Kou L, Chen W W, Zhang X Y, et al. Differential responses of needle and branch order-based root decay to nitrogen addition: Dominant effects of acid-unhydrolyzable residue and microbial enzymes. Plant and Soil, 2015, 394(1-2): 315-327.

21 Gao W L, Kou L, Yang H, et al. Are nitrate production and retention processes in subtropical acidic forest soils responsive to ammonium deposition? Soil Biology and Biochemistry, 2016, 100: 102-109.

22 Tang Y Q, Zhang X Y, Li D D, et al. Impacts of nitrogen and phosphorus additions on the abundance and community structure of ammonia oxidizers and denitrifying bacteria in Chinese fir plantations. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 103: 284-293.

23 高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制. 地理学报, 2018, 73(7): 1381-1393.

24 Geng J, Cheng S L, Fang H J, et al. Different molecular characterization of soil particulate fractions under N deposition in a subtropical forest. Forests, 2019, 10(10): 914.

25 Zhang X Y, Yang Y, Zhang C, et al. Contrasting responses of phosphatase kinetic parameters to nitrogen and phosphorus additions in forest soils. Functional Ecology, 2018, 32: 106-116.

26 Dai X Q, Wang H M, Fu X L. Soil microbial community composition and its role in carbon mineralization in long-term fertilization paddy soils. Science of the Total Environment, 2017, 580: 556-563.

27 Li L, McCormack M L, Ma C G, et al. Leaf economics and hydraulic traits are decoupled in five species-rich tropical-subtropical forests. Ecology Letters, 2015, 18(9): 899-906.

28 Fang H L, Ye Y C, Liu W W, et al. Continuous estimation of canopy leaf area index (LAI) and clumping index over broadleaf crop fields: An investigation of the PASTIS-57 instrument and smartphone applications. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 253-254: 48-61.

29 Fu X L, Wang J L, Di Y B, et al. Differences in fine-root biomass of trees and understory vegetation among stand types in subtropical forests. PLoS One, 2015, 10(6): e0128894.

30 Yan H, Kou L, Wang H M, et al. Contrasting root foraging strategies of two subtropical coniferous forests under an increased diversity of understory species. Plant and Soil, 2019, 436(1-2): 427-438.

31 Fu X L, Guo D L, Wang H M, et al. Differentiating between root- and leaf-litter controls on the structure and stability of soil micro-food webs. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 192-200.

32 Fu X L, Meinzer F C, Woodruff D R, et al. Coordination and trade-offs between leaf and stem hydraulic traits and stomatal regulation along a spectrum of isohydry to anisohydry. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(7): 2245-2258.

33 Fu X L, Meinzer F C. Metrics and proxies for stringency of regulation of plant water status (Iso/anisohydry): A global data set reveals coordination and trade-offs among water transport traits. Tree Physiology, 2019, 39(1): 122-134.

34 Yang F T, Feng Z M, Wang H M, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 234-235: 106-114.

35 Gao Y, Hao Z, Han N, et al. Tracking the fate of deposited nitrogen and its redistribution in a subtropical watershed in China. Ecohydrology, 2019, 12(5): e2094.

Ecological Restoration and Sustainable Development of Forest Ecosystem in Subtropical Red Soil Hilly Region Based on Long-term Observation and Research

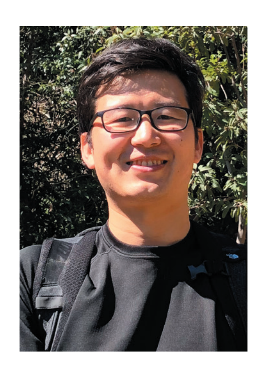
MA Zeqing WANG Huimin* YANG Fengting FU Xiaoli FANG Huajun WANG Jingsheng DAI Xiaoqin KOU Liang ZHAO Bo

（1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 Qianyanzhou Ecological Research Station, Chinese Academy of Sciences, Ji'an 343700, China）

Abstract The subtropical forest and red soil hilly region interlace in southern China is one of the largest eco-environmental protection areas, and it plays a crucial role in ecological civilization and national sustainable development. Achieving sustainable development of the region requires extensive actions to make economic and social progress, and at the same time, to strengthen eco-environmental protection. Qianyanzhou Ecological Research Station, Chinese Academy of Sciences ("Qianyanzhou Station" for short), locates in typical red soil hilly region, mainly studies the subtropical forest ecosystem structure and function. The station has observed the key ecological processes and patterns across plantations, evergreen broad-leaved forests, secondary forests, and other ecosystems for a long time. The station developed the "Qianyanzhou Model," which successively controlled the soil erosion and significantly enhanced ecological services and economic benefits, set an excellent example for this ecological restoration. The station is the earliest forest site to observe carbon and water flux in China, breaking through the technical bottleneck of collaborative observation of eddy-covariance and stable isotope technology. Further, they studied the mechanism of how subtropical forests respond to global changes from trees to region, and clarified the subtropical forest was a vital carbon sink in the northern hemisphere. The satiation revealed the coupling mechanism of material cycles and eco-hydrological processes from water-catchment to Ganjiang watershed. Qianyanzhou Station built several important demonstration models of multi-purpose forest management, and developed theory for subtropical forest ecosystem and management. Based on long-term study of root ecological process, the researchers of the station have unearthed evolutionary theory and provided the explanations for the root economic spectrum. Qianyanzhou Station is a typical station for subtropical forest, and represents a holistic restoration and sustainable development for mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands, providing a critical field platform for studying the subtropical forest ecosystems succession. It has also become a comprehensive station for regional observation and research, focusing on interdisciplinary studies between life sciences and geosciences.

Keywords underground ecological process, soil erosion, ecological restoration, flux, ecohydrology, plantation

*Corresponding author



马泽清　中国科学院地理科学与资源研究所研究员，中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站站长。长期从事森林生态系统生态学、植物功能生态学，生物地理学研究工作。曾主持国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目、面上项目等，中国科学院“基础前沿科学研究计划‘从 0 到 1’原始创新项目”1 项，国家重点研发项目课题 1 项。目前担任 *Journal of Ecology*、《生态学杂志》编委。研究成果在 *Nature*、*New Phytologist* 等杂志发表论文 40 余篇，相关研究成果被提名中国科学院前沿科学亮点成果。E-mail: mazq@igsnrr.ac.cn

MA Zeqing　Director of Qianyanzhou Ecological Research Station, Professor of the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has been funded by the Ecellent Young Scientists Fund, General Program of National Natural Science Foundation of China, Original Innovation Program from 0 to 1 of Basic Frontier Scientific Research Program of CAS, and National Key Research and Development Program of China. His main interests include biogeography of roots and mycorrhizal fungi, plant functional traits in relation to species coexistence and distributions, and forest ecosystem structure and function. He currently works on root eco-physiological processes across scales ranging from cells to ecosystems, to better characterize belowground ecological strategies. He has published more than 40 papers in peer-reviewed journals such as *Nature* and *New Phytologist*. He also serves as the Associate Editor of *Journal of Ecology* and *Chinese Journal of Ecology*.
E-mail: mazq@igsnrr.ac.cn



王辉民　中国科学院地理科学与资源研究所研究员，中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站首席科学家。中国自然资源学会常务理事，中国自然资源学会森林资源专业委员会主任。“十三五”国家重点研发计划“林业资源培育及高效利用技术”指南编写专家，国家重点研发计划重点专项绩效评估专家。从事森林生态学、生态系统物质循环、亚热带人工林生态系统结构功能及退化生态系统生态恢复等方面的研究。在国内外重要刊物上发表论文 150 余篇，出版专著 1 部。*Canadian Journal of Forest Research* 副主编，《资源科学》编委。E-mail: wanghm@igsnrr.ac.cn

WANG Huimin　Chief Scientist of Qianyanzhou Ecological Research Station, Professor of the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). He currently works in the field of forest ecology, nutrients cycling of ecosystems, and forest ecosystem management. He has published more than 150 peer-reviewed academic papers. He serves as an executive council member of the Society of Natural Resources of China, as a director in the Forest Resources Committee of Society of Natural Resources of China, as a commit member of forest managements organized by Ministry of Science and Technology of China. He also serves as the associate editor of *Canadian Journal of Forest Research* and is an editorial member of *Resources Science*.
E-mail: wanghm@igsnrr.ac.cn

■责任编辑：张帆